

Filip POLAK\*  
Wojciech SIKORSKI\*  
Krzysztof SIODŁA\*

## PROTOTYPOWY UKŁAD POMIAROWY DO LOKALIZACJI ŹRÓDEŁ EMISJI AKUSTYCZNEJ – MATRYCA MIKROFONÓW

W pracy zaprezentowany został prototypowy układ pomiarowy służący do lokalizacji źródeł sygnałów dźwiękowych, pochodzących od wyładowań niezupełnych, opierający się na technologii matryc sensorowych oraz algorytmów estymacji kierunku nadejścia sygnałów. Sygnały akustyczne odbierane są przy pomocy liniowej matrycy sensorów, w której elementami sensorycznymi są mikrofony pracujące w zakresie częstotliwości słyszalnych. Do estymacji kierunku nadejścia tych sygnałów użyto klasycznego algorytmu kształtowania wiązki, którego założenia teoretyczne zawarto w pracy. Docelowo układ będzie służył do określania lokalizacji źródła sygnałów akustycznych generowanych przez wyładowanie ulotowe.

SŁOWA KLUCZOWE: wyładowania niezupełne, lokalizacja źródeł sygnałów, matryca sensorowa, estymacja kierunku nadejścia sygnału (DOA), kształtowanie wiązki (*beamforming*)

### 1. WPROWADZENIE

Problematyka dotycząca detekcji, identyfikacji i lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych (wnz) stanowi obecnie przedmiot szeroko prowadzonych prac badawczych, mających na celu przede wszystkim poprawę wiarygodności aktualnie stosowanych metod diagnostyki i monitoringu transformatorów energetycznych opartych na detekcji zjawiska wnz [1-6]. Prace badawcze autorów niniejszego artykułu koncentrują się obecnie na poszukiwaniu nowych rozwiązań teoretycznych i technologicznych, które pozwoliłyby znacząco poprawić dokładność lokalizacji defektów wysokonapięciowego układu izolacyjnego.

Istotnym problemem są również wady konstrukcyjne lub montażowe napowietrznych elementów transformatora energetycznego, które mogą być przyczyną wystąpienia wyładowań ulotowych (np. wadliwe połączenia części

---

\* Politechnika Poznańska.

stykowych) lub wyładowań mogących powstać na zabrudzonej powierzchni izolatorów przepustowych. Problem dotyczy także nowych jednostek, gdzie podczas prób odbiorczych, w wyniku złego ekranowania pola elektromagnetycznego, na ostro zakończonych elementach może pojawić się ulot.

Bazując na założeniu, że sygnał akustyczny generowany przez ulot ma charakter szerokopasmowy, do lokalizacji miejsca występowania wyładowań zazwyczaj wykorzystywane są ultradźwiękowe anteny kierunkowe. Jest to jednak rozwiązanie mało precyzyjne i w dużej mierze zależne od doświadczenia osoby wykonującej pomiar.

Przedstawiana w poprzednich artykułach [9, 10] koncepcja zakłada zastosowanie techniki macierz sensorowych do oszacowania kierunku nadejścia sygnału emisji akustycznej bądź impulsu elektromagnetycznego (ang. DOA – *Direction-of-Arrival Estimation*) generowanego przez wnz.

Niniejszy artykuł poszerza dotychczasowo zaprezentowane rozwiązania o zastosowanie algorytmu kształtowania wiązki (ang. *beamforming*), które z racji mniejszego stopnia skomplikowania (mała złożoność obliczeniowa) stanowią pewną alternatywę dla wysokorozdzielczych algorytmów estymacji kierunku nadejścia sygnału takich, jak *MUSIC*, *Root-MUSIC*, *ESPRIT* itp.

W dalszej części artykułu zaprezentowane zostały założenia prototypowego układu pomiarowego wykorzystującego mikrofony pojemnościowe o dookólnej charakterystyce kierunkowej jako elementy sensoryczne macierzy.

## 2. KSZTAŁTOWANIE WIĄZKI – *BEAMFORMING*

Metody formowania wiązki (ang. *beamforming*) polegają na przestrzenno-czasowym przetwarzaniu sygnału rejestrowanego przez macierzę mikrofonów. Sygnały akustyczne odebrane przez poszczególne elementy macierzy podlegają analizie amplitudowo-fazowej, dzięki której otrzymuje się zależności korelacyjne pomiędzy tymi sygnałami. W dalszej części rozpatrywany będzie przypadek z wykorzystaniem liniowej macierzy sensorów (ang. *ULA – Uniform Linear Array*), której zasada działania została szczegółowo opisana w [9].

Rozważmy liniową macierz odbiorczą składającą się z  $M$  identycznych, równo od siebie oddalonych i ułożonych wzdłuż jednej linii, elementów odbiorczych. Odległość pomiędzy sąsiadującymi przetwornikami jest stała i wynosi  $\Delta$ . Załóżmy, że sygnał  $x(t)$  generowany przez źródło, znajdujące się w polu dalekim macierzy, ma charakter wąskopasmowy i dociera do macierzy pod kątem  $\theta$ . Sygnały odebrane przez poszczególne elementy, uwzględniając opóźnienie  $\tau_i$ , oznaczmy poprzez wektor  $\mathbf{x}(t)$ :

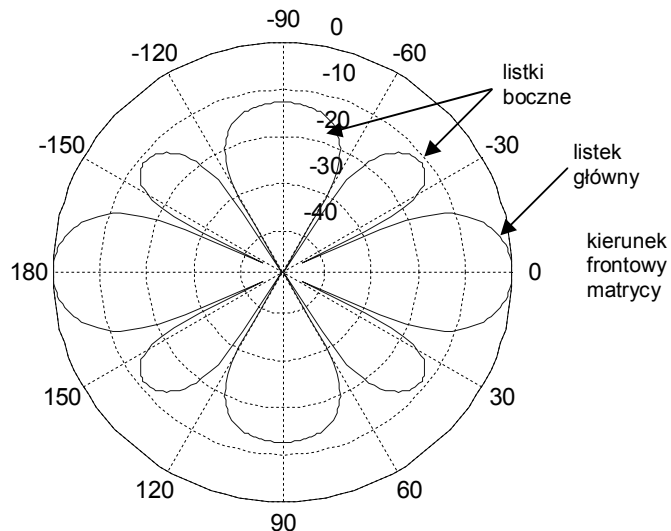
$$\mathbf{x}(t) = [x(t - \tau_1), x(t - \tau_2), \dots, x(t - \tau_M)]^T. \quad (1)$$

Kiedy znana jest prędkość sygnału  $v$  opóźnienie może być wyliczone ze wzoru:

$$\tau_i = i \frac{\Delta \sin \theta}{v}, \quad (2)$$

przy czym przyjmuje się, że prędkość dźwięku w powietrzu wynosi 340 m/s. W algorytmie *beamformingu* sygnały odebrane przez każdy z sensorów są sumowane, więc w przypadku gdy źródło znajduje się idealnie naprzeciw matrycy (kąt padania fali  $\theta = 0^\circ$ , więc  $\tau = 0$ , czyli do każdego z mikrofonów dotrze taki sam sygnał) na wyjściu otrzymamy przebieg wzmocniony  $M$  razy. Wraz ze zmianą kąta  $\theta$  zmieniać się będzie również opóźnienie. Wynikiem sumowania opóźnionych sygnałów są tzw. prążki interferencyjne na charakterystyce kierunkowej matrycy (rys. 1).

Charakterystyka kierunkowa matrycy 4-elementowej



Rys. 1. Charakterystyka kierunkowa matrycy składającej się z 4 mikrofonów, dla kąta elewacji  $0^\circ$ , wyrażona w skali decybelowej ( $f = 2000$  Hz,  $\Delta = 10$  cm,  $\theta = 0^\circ$ )

Klasyczny algorytm kształtowania wiązki, czyli *delay-and-sum beamforming*, można wytłumaczyć na zasadzie dodawania do zarejestrowanych sygnałów opóźnień, odpowiadających zmianie położenia kąтового źródła (patrz wzór 2) względem kierunku referencyjnego, który zazwyczaj jest normalną do osi matrycy. Dla każdego argumentu dokonuje się sumowania przebiegów. W ten sposób wyznaczana jest funkcja korelacji wzajemnej odebranych przebiegów, której maksimum odpowiada kierunkowi nadejścia sygnału. Oznacza to, że opóźniając sygnały o wartość odpowiadającą danemu kątowi, na wyjściu otrzymamy przebiegi nieprzesunięte – stąd najwyższa wartość sumy [7, 11].

### 3. PROTOTYPOWY UKŁAD POMIAROWY – MATRYCA MIKROFONOWA

Wyładowania ulotowe generują sygnały o szerokim spektrum częstotliwości, m.in. w paśmie słyszalnym. Z tej przyczyny mikrofony w matrycy sensorowej przeznaczonej do lokalizacji źródeł dźwięku pochodzącego od ulotu powinny obejmować cały zakres częstotliwości słyszalnych (20 Hz - 20 kHz) oraz cechować się dookólną charakterystyką kierunkową. Wymaganiom tym wychodzą naprzeciw mikrofony pomiarowe Superlux ECM-999 (rys. 2), które też zostały wykorzystane do budowy matrycy.



Rys. 2. Pojedynczy mikrofon Superlux ECM-999 wraz z uchwytem HM-10B

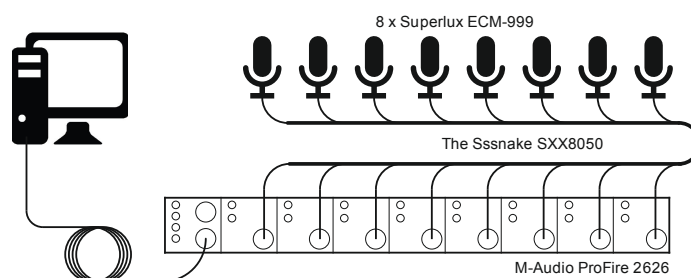
Akwizycja danych, czyli sygnałów odbieranych przez każdy z mikrofonów możliwa jest dzięki zastosowaniu ośmiokanałowej karty muzycznej ProFire 2626, produkcji firmy M-Audio (rys. 3), charakteryzującej się wysoką rozdzielczością (24 bit) i częstotliwością próbkowania na poziomie 48 kHz. Mikrofony ECM-999 są połączone z kartą muzyczną profesjonalnym, ośmiożyłowym przewodem The Ssnake SXX8050.



Rys. 3. Karta muzyczna M-Audio ProFire 2626

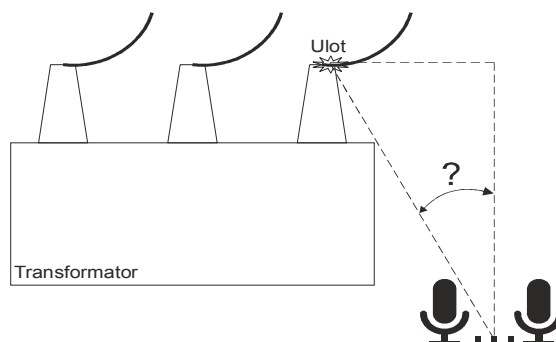
Na rysunku 4 przedstawiono ideowy schemat połączeń układu pomiarowego. Opisany układ pracuje w zakresie częstotliwości. Zastosowanie mikrofonów w koncepcyjnym układzie pomiarowym pozwala na pewną dowolność w

projektowaniu samej matrycy. Możliwe jest sprawdzenie efektywności pracy z różną ilością sensorów (mikrofonów) oraz różną konfiguracją geometryczną (np. liniowa, kwadratowa).



Rys. 4. Schemat ideowy układu pomiarowego

Dzięki połączeniu algorytmów estymacji kierunku nadejścia sygnału oraz techniki matryc sensorowych możliwe jest wyznaczenie kierunku, z jakiego fala akustyczna dochodzi do matrycy. Matrycę ustawia się w różnych położeniach względem źródła emisji akustycznej na przygotowanej wcześniej podziałce kątowej (rys. 5). Wyznaczone wartości kątów są następnie porównywane z wartościami według których ustawiona została matryca.



Rys. 5. Uproszczony schemat obrazujący sposób przeprowadzania pomiarów

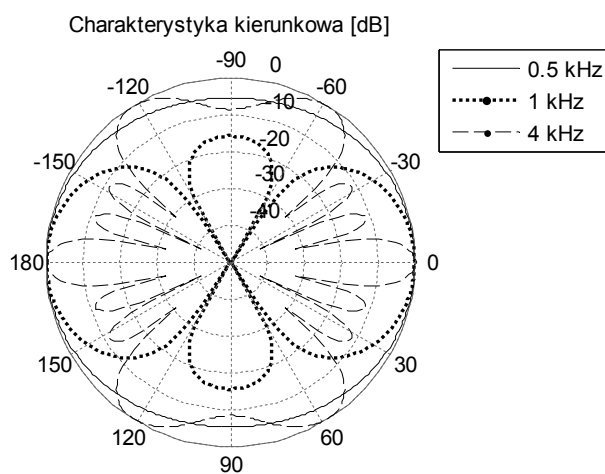
#### 4. LOKALIZACJA ŹRÓDEŁ WNZ – WYNIKI SYMULACJI

Podstawowym parametrem opisującym matryce sensorowe jest charakterystyka kierunkowa. W punkcie 3. wspomniano, że pojedynczy element odbiorczy powinien posiadać charakterystykę dookólną. Stosując algorytm kształtowania wiązki możliwe jest również wyznaczenie takiej charakterystyki dla całej matrycy. Parametr ten określa moc sygnału docierającego do matrycy z danego kierunku, czyli jest niejako wyrażeniem sprawności użytej matrycy w zależności od kąta padania sygnału.

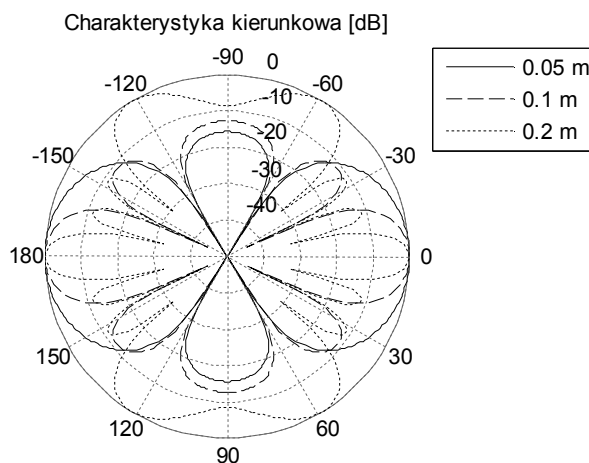
Przy założeniu, że prędkość propagacji sygnału jest stała, charakterystyki kątowe matrycy zależne są od trzech parametrów:

- częstotliwości sygnału,
- ilości zastosowanych elementów odbiorczych,
- odległości między poszczególnymi sensorami [7, 8].

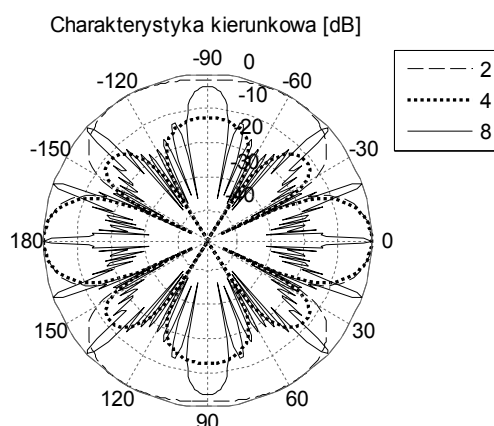
W programie MATLAB zostały wyznaczone przykładowe charakterystyki kierunkowe uzależnione od powyższych parametrów (rys. 6, 7, 8).



Rys. 6. Przykład teoretycznych charakterystyk kierunkowych liniowej matrycy czteromikrofonowej ( $l = 10$  cm) dla różnych częstotliwości sygnału



Rys. 7. Przykład teoretycznych charakterystyk kierunkowych liniowej matrycy czteromikrofonowej ( $f = 2$  kHz) dla różnych odległości między mikrofonami



Rys. 8. Przykład teoretycznych charakterystyk kierunkowych liniowych matryc składających się z 2, 4 i 8 mikrofonów ( $f = 2$  kHz) przy stałej szerokości całkowitej matrycy

## 5. PODSUMOWANIE

Lokalizacja źródeł dźwięku przy pomocy matryc mikrofonowych oraz algorytmów kształtowania wiązki jest technologią szeroko stosowaną m.in. w branży *Automotive* (do wyznaczania „głośnych” miejsc pojazdów) czy przy badaniach środowiskowych, czyli podczas tworzenia tzw. panoram akustycznych.

Przedstawiona w niniejszym artykule koncepcja budowy prototypowego układu pomiarowego do lokalizacji źródeł dźwięku docelowo ma znaleźć zastosowanie w lokalizacji wylądowań ulotowych, powstających np. w okolicach izolatorów przepustowych transformatorów energetycznych w wyniku m.in. wad konstrukcyjnych, materiałowych, czy złego pasowania elementów transformatora. Sytuacja taka zazwyczaj ma miejsce podczas prób odbiorczych transformatorów. Występowanie ulotu jest zjawiskiem niepożądanym, w związku z czym lokalizacja takiego miejsca znacznie przyspieszyłaby diagnozę, wprowadzenie środków zaradczych i w rezultacie odbiór jednostki.

Kolejnym etapem badań będzie wyznaczenie charakterystyk kierunkowych rzeczywistej matrycy oraz porównanie ich z wyznaczonymi w niniejszym artykule charakterystykami teoretycznymi. Równoległe z badaniami dotyczącymi przedstawionego problemu prowadzone są prace nad zastosowaniem matryc sensorowych do lokalizacji wylądowań niepełnych, które towarzyszą powstawaniu defektów w izolacji stałej transformatora.

*Publikacja powstała w ramach realizacji projektu "Inżynier Przyszłości. Wzmocnienie potencjału dydaktycznego Politechniki Poznańskiej.", nr POKL.04.03.00-00-259/12, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.*

## LITERATURA

- [1] Sinaga H.H., Phung B.T., Blackburn T.R., Recognition of single and multiple partial discharge sources in transformers based on ultra-high frequency signals, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, pp. 160-169, 2014.
- [2] Youchen Wang, Chaojie Zhu, Qiaohua Wang, Zhihao Wang, Yi Yin, Processing of partial discharge ultra-high frequency signals from a true size transformer, *IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, Bologna, Italy, pp. 1012-1015, 2013.
- [3] Sikorski W., Walczak K., PDtracker – system monitoringu wyładowań niezupełnych w transformatorze energetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10/2014, wyd. SIGMA-NOT, s. 45-49.
- [4] Markalous S., Tenbohlen S., Feser K., Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, pp. 1576-1583, 2008.
- [5] Sikorski W., Siodła K., Moranda H., Ziomek W., Location of partial discharge sources in power transformers based on advanced auscultatory technique, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, pp. 1948-1956, 2012.
- [6] Sikorski W., Ziomek W., Detection, Recognition and Location of Partial Discharge Sources Using Acoustic Emission Method (Chapter 3), *Acoustic Emission*, InTECH Publisher, ISBN 978-953-51-0056-0, 2012.
- [7] Gade S., Hald J., Ginn B., Noise Source Identification with Increased Spatial Resolution, *The Journal of Sound and Vibration*. ELSEVIER, February 2013, ISSN: 0022-460X, pp. 9-13.
- [8] Motylewski J., Pawłowski P., Rak M., Zieliński T. G., Identyfikacja źródeł aktywności wibroakustycznej maszyn metodą kształtowania wiązki sygnału (beamforming), *XXXVII Polish Symposium on Machine Diagnostics*, pp.1-8, 2010.
- [9] Polak F., Sikorski W., Siodła K., Lokalizacja źródeł wyładowań niezupełnych przy użyciu matrycy przetworników, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering Issue 78*, ISSN: 1897-0737, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, s. 157-166, 2014.
- [10] Polak F., Sikorski W., Siodła K., Lokalizacja źródeł wyładowań niezupełnych przy użyciu matryc sensorowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10/2014, wyd. SIGMA-NOT, s. 74-77.
- [11] Using Acoustic Beamforming for Pass-By Noise Source Detection, *National Instruments Application Notes*, <http://www.ni.com/pdf/app-note/acoustic-beamforming.pdf>, dostęp: 28.01.2015.

### PROTOTYPE MEASUREMENT SYSTEM FOR LOCALISATION OF PARTIAL DISCHARGES SOURCES – MICROPHONE ARRAY

This paper presents a prototype measurement system, that will be used for localisation of acoustic emission sources. It is based on sensor arrays technology and direction of arrival estimation algorithms. Acoustic signals will be received with a universal linear array (ULA) of sensors, wherein the sensory elements are microphones operating in the audible frequency range. For the estimation of the direction of arrival of these signals conventional beamforming algorithm is used which has also been described theoretically. Ultimately, the system will be used to determine the direction of arrival of the acoustic signal generated by the insulation defect, which is corona discharge.